

А. В. КРАСИЛЬНИКОВ

МЕТОДИКА ПРОЕКТНОЙ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖАНИЯ ДАВЛЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СТЕНДА

Рассмотрена роль гидродинамических стендов при организации производства пусковых систем подводных роботов. Приведены особенности составления математических моделей для расчета физических процессов в гидродинамических стендах, предназначенных для проведения комплексных испытаний пусковых систем. Представлен общий подход к оценке конструктивных параметров стенда на основе математической модели его функционирования.

Ключевые слова: подводный робот, испытания, гидродинамический стенд, оценка параметров стенда, математическое моделирование.

Сегодня не вызывает сомнения, что будущее морских технологий неразрывно связано с расширенным применением подводных роботов (ПР). Постоянно увеличивающийся диапазон рабочих глубин, освоение районов со сложной надводной гидро-, метео- и ледовой обстановкой и ряд других факторов определяют необходимость развития тесно связанного с ПР класса сложных устройств — пусковых систем, обеспечивающих взаимодействие роботов с различными (в первую очередь, подводными) носителями, выполняющих принудительное отделение ПР от носителя за счет приложения к нему кратковременного силового импульса. В качестве примера такой пусковой системы можно привести устройство, описанное в работе [1].

Производство любой современной сложной технической системы невозможно без должной технологической подготовки, важной составляющей которой является проведение испытаний создаваемой техники в производственных помещениях на стендовом оборудовании. Наиболее ответственным и затратным этапом исследований являются комплексные испытания, позволяющие оценить общую работоспособность системы при имитации всех (или большинства) внешних факторов, оказывающих воздействие на ее функционирование в реальных условиях.

Для проведения комплексных испытаний пусковых систем ПР создаются гидродинамические стенды (ГДС), одной из основных задач которых является отработка энергетической системы пускового устройства в условиях внешнего противодействия как основного фактора, влияющего на работу этого устройства [2, 3]. Имитация внешних условий обеспечивается за счет создания внутри испытательной камеры, в которую выходит ПР, давления, равного по своей величине забортному, для чего внутри испытательной камеры, заполненной водой, формируют воздушную полость [4, 5].

Такие стенды представляют собой сложные технические объекты, поэтому создание стендов невозможно без теоретического обоснования их параметров, т.е. проектирование ГДС должно осуществляться на базе предварительного математического моделирования физических процессов, происходящих при пуске ПР в стенде и пусковом устройстве. В то же время возможности решения практической задачи проектирования ГДС всегда ограничены, что требует применения расчетных подходов, позволяющих получить приемлемый результат с минимальными затратами (в первую очередь, временными). Это обстоятельство практически исключает применение сложных математических моделей, полностью воспроизводящих физическую картину. Поэтому в основном для составления математических моделей работы ГДС применяется подход, предусматривающий разбиение стенда и пускового устройства на

ряд взаимосвязанных отдельных объемов, для каждого из которых на основе известных законов газо- и гидродинамики составляется система дифференциальных уравнений.

Основная проблема при проектировании ГДС связана с тем, что ПР из пускового устройства попадает внутрь замкнутого объема испытательной камеры ГДС, поэтому давление в последней в момент пуска повышается, что приводит к снижению скорости ПР по сравнению с реальными условиями. Данное отрицательное воздействие ГДС необходимо по возможности уменьшить или компенсировать.

Преодолеть эту проблему можно, увеличив значение коэффициента n ($n = V_{\text{в}}/V_{\text{ПР}}$, $V_{\text{в}}$ — объем воздушной полости стенда, $V_{\text{ПР}}$ — водоизмещение робота). Чем выше значение n , тем меньше изменится давление внутри ГДС в процессе пуска. Однако повышение коэффициента n (обычное значение 20—40) приводит к значительному увеличению массогабаритных характеристик ГДС.

Автором предложен перспективный способ поддержания постоянного давления в ГДС при организации комплексных испытаний пусковых устройств малогабаритных необитаемых подводных аппаратов (НПА), позволяющий создавать стенды с малыми объемами воздушных полостей [5]. Ниже приводится методика оценки проектных характеристик подобного ГДС.

При составлении математической модели функционирования ГДС принимаются следующие допущения:

1) динамические физические процессы рассматриваются как квазистационарные, т.е. процессы в неустановившемся режиме описываются с помощью тех же закономерностей, что и в установившемся (в каждый отдельный момент времени параметры газа определяются из уравнения его состояния);

2) потоки жидкостей и газов считаются однородными, а в качестве основных параметров течений используются осредненные по поперечному сечению потока значения давлений и скоростей;

3) жидкости внутри ГДС и пускового устройства считаются несжимаемыми;

4) ввиду малого времени процесса пуска робота теплообмен не учитывается;

5) так как для рассматриваемого варианта ГДС целесообразно ограничить диапазон имитируемых глубин до 300 метров, при описании газодинамических процессов в воздушной полости ГДС используется модель идеального газа, что оправданно ввиду ее применимости для расчетов газовой динамики в области низких давлений.

Общая математическая модель работы воздушного пускового устройства в условиях ГДС подробно рассмотрена в книге [2]. В настоящей статье рассматривается только математическая модель газодинамических процессов в воздушной полости ГДС, позволяющая выбирать основные конструктивные параметры воздушной полости и системы поддержания давления.

Основными параметрами, характеризующими состояние газа (смеси газов) в газовой (воздушной) полости ГДС, имеющей объем V , являются давление P и температура T . Представим систему дифференциальных уравнений для расчета процессов в газовой полости ГДС:

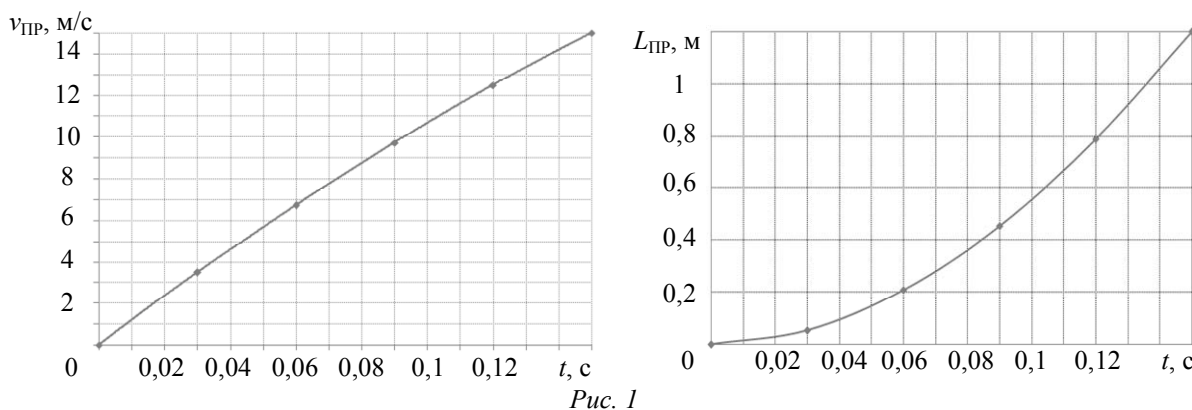
$$\left. \begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= -(f_{\text{ПР}}v_{\text{ПР}} + f_{\text{кз}}v_{\text{кз}}) \approx 1,25f_{\text{ПР}}v_{\text{ПР}}, \\ \frac{dP}{dt} &= \frac{1}{V} \left(-kRT \frac{dM}{dt} - kP \frac{dV}{dt} \right), \\ \frac{dT}{dt} &= \frac{T}{PV} \left(P \frac{dV}{dt} + V \frac{dP}{dt} + RT \frac{dM}{dt} \right), \\ \frac{dM}{dt} &= Pq \frac{1}{\sqrt{RT}} \sum_i \mu_{\text{ки}} f_{\text{ки}}, \end{aligned} \right\}$$

где t — время процесса пуска, с; $\frac{dV}{dt}$ — изменение объема газовой полости за счет входа ПР в ГДС; $\frac{dP}{dt}$ — изменение давления в газовой полости; $\frac{dT}{dt}$ — изменение температуры в газовой полости; $\frac{dM}{dt}$ — расход воздуха из газовой полости через клапаны системы поддержания давления; $f_{\text{ПР}}$ — площадь поперечного сечения ПР, м²; $v_{\text{ПР}}$ — скорость движения ПР, определяемая с помощью математической модели работы пускового устройства, м/с; $f_{\text{КЗ}}$ — площадь поперечного сечения кольцевого зазора в обтюрации пускового устройства, м²; $v_{\text{КЗ}}$ — скорость движения жидкости в кольцевом зазоре пускового устройства, определяемая с помощью математической модели его функционирования, м/с; k — коэффициент адиабаты; R — универсальная газовая постоянная; q — функция расхода, зависящая от отношения давления в газовой полости ГДС и атмосферного давления; $f_{\text{ки}}$ — площадь проходного сечения i -го клапана, м²; $\mu_{\text{ки}}$ — коэффициент расхода через i -й клапан.

С помощью приведенной математической модели исследовалась целесообразность применения описанного способа. Целью исследования было подтверждение возможности удержания изменения давления при пуске ПР в воздушной полости ГДС в пределах 5 % от установочного P_h (калибр ПР 127 мм, диапазон глубин $h=0$ —300 м). Исходные данные для моделирования процесса следующие:

- длина ПР — 1,2 м;
- начальный объем (были рассмотрены три варианта) воздушной полости ГДС — $V_{\text{в1}} = 0,120$ м³ ($n = 8$), $V_{\text{в2}} = 0,075$ м³ ($n = 5$), $V_{\text{в3}} = 0,060$ м³ ($n = 4$);
- число клапанов в системе поддержания давления — 3;
- площадь проходных сечений клапанов — 60 мм² (диаметр сечения $d = 9$ мм), 600 мм² ($d = 28$ мм), 1000 мм² ($d = 36$ мм);
- общая длительность процесса пуска ПР — 0,15 с.

Заданные законы изменения скорости и перемещения ПР $L_{\text{ПР}}$ от времени представлены на рис. 1.



При первичной оценке работоспособности ГДС было принято допущение о том, что для всех значений h общее время пуска и характер зависимостей скорости и перемещения ПР от времени одинаковы (в действительности эти параметры зависят от глубины пуска робота, что должно соответствующим образом учитываться при рабочем проектировании). Соответственно неизменными оставались и моменты начала открытия каждого из клапанов.

Моделирование процессов, происходящих в ГДС при пуске ПР, осуществлялось в среде MatLab. Предварительно были проведены исследования функционирования ГДС без включения системы поддержания давления. Общее время моделирования было задано 0,35 с, при этом процесс пуска ПР начинался по прошествии 0,2 с от момента начала моделирования.

На рис. 2 показан характер изменения объема и давления в воздушной полости при пуске ПР на $h = 100$ м (при $V_{в1} = 0,120$ м³).

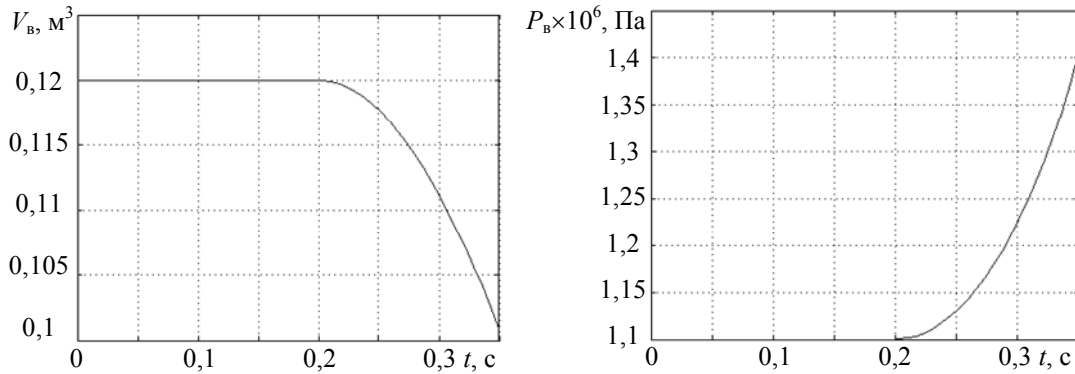


Рис. 2

Как можно видеть, объем воздушной полости в процессе пуска ПР уменьшается, а давление в ней растет. К моменту окончания пуска давление внутри полости превышает начальное на $3,03 \cdot 10^5$ Па. В случае пуска ПР при $h=300$ м конечное давление будет выше начального на $8,56 \cdot 10^5$ Па.

После получения данных о работе ГДС без использования системы поддержания давления были проведены исследования с ее применением, направленные на выбор рациональных моментов начала открытия клапанов. В рамках этих исследований последовательным подбором было найдено приемлемое сочетание моментов открытия клапанов, которое позволило получить желаемые результаты. Установлено, что открытие наименьшего по проходному сечению клапана должно начинаться (момент времени t_1) до начала пуска ПР, а открытие двух других (t_2 и t_3) клапанов — после начала пуска. Также были определены требуемые параметры быстродайствия клапанов (линейное увеличение проходного сечения до момента Δt_i полного открытия i -го клапана). Пуск ПР, как и в предварительных исследованиях, начинался по прошествии 0,2 с от старта моделирования. В итоге моменты t_i начала открытия и время Δt_i до полного открытия сечения для клапанов составили:

- $t_1 = 0,11$ с, $\Delta t_1 = 0,04$ с ($d = 9$ мм);
- $t_2 = 0,23$ с, $\Delta t_2 = 0,07$ с ($d = 28$ мм);
- $t_3 = 0,21$ с, $\Delta t_3 = 0,09$ с ($d = 36$ мм).

На рис. 3 приведен характер изменения давления в воздушной полости ГДС при пуске ПР с использованием системы поддержания давления ($V_{в1} = 0,12$ м³, $h=100$ м).

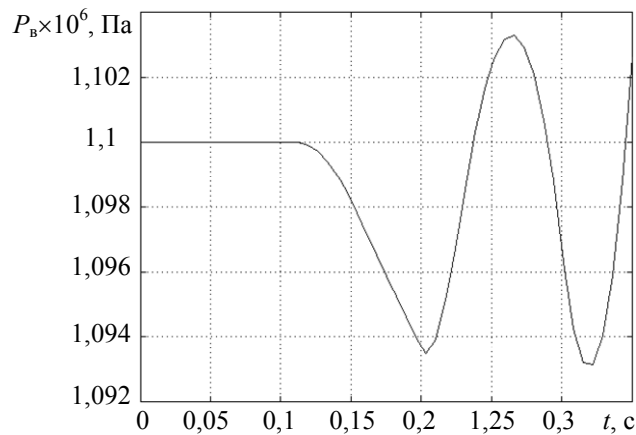


Рис. 3

В таблице представлены результаты исследования зависимости колебаний давления в воздушной полости ГДС от ее объема и глубины пуска ПР. При этом отклонения в сторону

уменьшения установочного давления P_h (отрицательные) обозначены как ΔP_{\min} , а в сторону увеличения (положительные) — как ΔP_{\max} .

Максимальные значения отклонений давления в воздушной полости от установочного в зависимости от объема воздушной полости и глубины пуска ПР

h , м	ΔP_{\min} , МПа	ΔP_{\max} , МПа	ΔP_{\min} , МПа	ΔP_{\max} , МПа	ΔP_{\min} , МПа	ΔP_{\max} , МПа
	$V_{в1} = 0,120 \text{ м}^3$		$V_{в2} = 0,075 \text{ м}^3$		$V_{в3} = 0,060 \text{ м}^3$	
100	0,0069	0,0033	0,0117	0,0054	0,0152	0,0076
200	0,0133	0,0063	0,0223	0,0102	0,0290	0,0145
300	0,0196	0,0093	0,0330	0,0115	0,0428	0,0214

Можно видеть, что даже при очень небольшом объеме воздушной полости ($n=4$) максимальное отклонение давления в ней во всем диапазоне глубин до 300 м составит менее 2 % от установочного.

Выводы. Представленная математическая модель позволяет осуществлять проектную оценку характеристик системы поддержания давления гидродинамического стенда.

Исследования предложенного способа поддержания давления в воздушной полости ГДС показали, что при $h=300$ м возможно достичь значения $\Delta P=0,05P_h$ за счет выбора клапанов и алгоритмов управления их открытием, что особенно актуально при проектировании ГДС для ПР малого калибра, поскольку в этом случае возможно создание ГДС, не требующего аттестации Ростехнадзором (например, в ГДС для ПР калибра 127 мм при $n = 5$ и $h < 600$ м $V_{в}P_{\max} < 10\,000$ ($V_{в}$ в литрах, P_{\max} — в атмосферах), т.е. меньше значения, установленного Ростехнадзором как граничное, до которого аттестации оборудования не требуется [6]).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент № 87511, МПК F41F 3/10 РФ. Транспортно-пусковой контейнер / О. И. Ефимов, А. В. Красильников, Р. В. Красильников. Заявл. 04.06.2009; опубл. 10.10.2009. Бюл. № 28.
2. Красильников А. В., Ефимов О. И., Валетов В. А. Испытания пусковых устройств подводных роботов. СПб: Изд-во СПбГМТУ, 2012. 102 с.
3. Шафранский Е. П. Воздушные ТА отечественных ПЛ. СПб: ОАО СПМБМ „Малахит“, 2012. — 158 с.
4. Патент № 2449254, МПК G01M 10/00 РФ. Гидродинамический стенд / О. И. Ефимов, А. В. Красильников, Р. В. Красильников. Заявл. 07.06.2010; опубл. 27.04.2012. Бюл. № 12.
5. Патент № 115477, МПК G01M 10/00 РФ. Гидродинамический стенд с системой поддержания давления / А. В. Красильников. Заявл. 10.01.2012; опубл. 27.04.2012. Бюл. № 12.
6. ПБ 03-576-03 Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. Утверждены постановлением Госгортехнадзора РФ от 11 июня 2003 г. № 91.

Сведения об авторе

Антон Валентинович Красильников — канд. техн. наук, старший научный сотрудник; Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, научно-исследовательский сектор перспективных энергетических установок; E-mail: a.v.krasilnikov@mail.ru

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
09.04.14 г.